

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Modelování koroze materiálů panelu letadla v prostředí solné mlhy.

SIMULATE CORROSION OF MATERIALS PART OF AIRCRAFT IN THE SALT SPRAY ENVIRONMENT

BAKALŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

LUKÁŠ CÉNEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. BOHUMIL PACAL, CSc.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁRSKÉ PRÁCE

student(ka): Lukáš Cének

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Modelování koroze materiálu panelu letadla v prostředí solné mlhy

v anglickém jazyce:

Simulate corrosion of materials part of aircraft in the salt spray environment

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá kvantitativním zpracováním výsledků z korozního napadení materiálů použitých na panel pláště letadla v prostředí solné mlhy za definovaných laboratorních podmínek a vytvořením matematického modelu.

Cíl bakalářské práce:

Popis základních vlastností u slitin hliníku – tepelné zpracování, chemické složení a vlastnosti. Rozdělení a příčiny vzniku koroze. Popis zkoušky v solné mlze, určení laboratorních podmínek a sestavení matematického modelu z výsledků měření v laboratořích.

Seznam odborné literatury:

- [1] PTÁČEK, L. a kolektiv, Nauka o materiálu II., Brno: CERM, 1999, 350 s. ISBN 80–7204–30–4
- [2] ROBERGE, R. PIEREE, Handbook of corrosion engineering, USA: McGraw-Hill, 1999, 1129 s., ISBN 0-07-076516-2.
- [3] ČERNÝ, M. a kol., Korozní vlastnosti kovových konstrukčních materiálů, 1.vydání, Praha SNTL, 1984, 264 s, DT 620.193:669.018.
- [4] TULKA, J. Povrchové úpravy materiálu, 1. Vydání, Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2005, 136 s. ISBN 80-214-3062-5
- [5] MICHNA, Š., LUKÁČ, I., OCENÁŠEK, V., KORENÝ, R., DRÁPALA, J., SCHNEIDER, H., MIŠKUFOVÁ, A., a kol., Encyklopedie hliníku, Prešov 2005, ISBN 80-89041-88-4.
- [6] ČSN EN ISO 9227 (03 8132): Korozní zkoušky v umělých atmosférách – Zkoušky solnou mlhou. Praha, Český normalizační institut, 2007, 24 s.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Bohumil Pacal, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 16.1.2012

L.S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.

Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.

Děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na korozní chování slitin hliníku u panelu letadla v prostředí solné mlhy. Panely jsou vyrobeny z duralových plechů (AlCu_4Mg_1) s povrchovou vrstvou hliníku o čistotě 99,5 % a z úhelníků tvaru „L“, také z duralu (AlCu_4Mg_1), bez povrchové ochranné vrstvy. Z dřívějšího experimentu byly získány hodnoty rychlosti koroze a hmotnostní úbytky. Cílem práce je vyhodnocení vzorků a vytvoření matematického modelu pro zkoušku v solné mlze u panelů letadla.

KLÍČOVÁ SLOVA

Hliník, slitiny hliníku, koroze, solná mlha.

ABSTRACT

This bachelor's thesis is focused on the corrosion behaviour of aluminium alloys of panel of an aircraft in the salt spray environment. The panels are made of dural sheet (AlCu_4Mg_1), with surface coated with aluminium of purity 99,5 % and of L-square shapes of dural too (AlCu_4Mg_1), without coating. There were obtained values of corrosion rate and weight losses from previous experiment. The aim of the thesis is to evaluate the samples and a create mathematical model for the salt spray test panels for aircraft.

KEY WORDS

Aluminium, aluminium alloys, corrosion, salt fog.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

CÉNEK, L. *Modelování koroze materiálů panelu letadla v prostředí solné mlhy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 40 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Bohumil Pacal, CSc..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci vypracoval samostatně dle pokynů vedoucího bakalářské práce a použil jen prameny uvedené v seznamu literatury.

V Brně

Lukáš Cének

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Bohumilu Pacalovi, CSc. za věcné připomínky k tématu a paní Ing. Evě Novotné, Ph.D., Paed IGIP za pomoc při zpracování výsledků zkoušky.

Obsah

Úvod	9
Výroba a surovinové zdroje pro výrobu hliníku	10
Vývoj slitin hliníku	10
Značení hliníku a slitin hliníku	11
Mechanické vlastnosti	12
Mechanické vlastnosti hliníku, jeho slitin a jiných kovů	12
Precipitačního zpevnění	12
Slitiny AlCuMg	13
Chemické vlastnosti hliníku a jeho slitin	13
Korozní vlastnosti hliníku a jeho slitin	14
Vliv chemického složení na korozi	15
Vliv korozního prostředí	15
Atmosférická koroze	15
Koroze ve vodě	16
Koroze v roztocích solí	16
Bodová koroze	16
Mezikrystalická koroze	17
Koroze po vrstvách	17
Korozní praskání	17
Korozní únava	17
Vibrační koroze	17
Kontaktní koroze	18
Zkouška solnou mlhou	19
Předmět normy ČSN EN ISO 9227	19
Zkoušky	19
Zkušební zařízení	19
Hodnocení korozní agresivity zkušebního prostoru	20
Zkouška NSS	20
Zkouška AASS	20
Zkouška CASS	20
Podmínky při zkoušce	21
Zpracování a vyhodnocení vzorků	21
Materiál pro experiment	23
Zkušební vzorky a jejich uspořádání	25
Experimentální data	27
Modelování	30
Závěry	38
Seznam použité literatury	39
Seznam příloh	40

Úvod

Hliníkové slitiny jsou využívány díky svým specifickým technologickým, mechanickým, fyzikálním i chemickým vlastnostem. Využívají se pro dobrou pevnost v tahu, tažnost, nízkou měrnou hmotnost a nízkou teplotu tání, dobrou svařitelnost (v ochranné atmosféře), obrobitelnost a odolnost vůči korozi.

Počátky jeho komerčního využití sahají do doby přibližně před sto lety. Tehdy byl velmi drahý a využíval se i v klenotnictví. Postupně cena klesala a hliník se rozšířil téměř do všech odvětví. [1]

Tab. 1 - celosvětová spotřeba hliníku a jeho slitin v odvětvích

Odvětví	Spotřeba [%]
Doprava	59,1
Stavebnictví	18,4
Strojírenský	10,3
Elektrotechnický	7,2
Potravinářský průmysl	4,3
Ostatní	0,7

Díky nízké měrné hmotnosti je hliník a jeho slitiny využívány nejvíce v dopravním odvětví, zde vede ke snižování hmotnosti a tím ke snížení spotřeby paliva, což má příznivý dopad jak ekonomický tak ekologický, v dopravě tvoří téměř 60% výroby (skříně motorů, válce, pouzdra tlumičů, hnací součástky, části klimatizace, volanty, karoserie...) dále se uplatňuje ve stavitelství, strojírenství, hutnictví, energetice, elektrotechnice, chemickém průmyslu, sportu, navíc je zdravotně nezávadný, což umožňuje jeho použití i v potravinářském průmyslu a jiných odvětvích kde by jiné prvky mohly mít dopad na lidské zdraví (klenotnictví). Hliník je elektricky vodivý a na vzduchu je poměrně stálý (pasivuje se tenkou vrstvičkou Al_2O_3 , ta zabraňuje dalšímu přístupu kyslíku ke kovu). Ale přesto je nezbytné použití korozivzdorných materiálů či povlaků, nejen z hlediska ekonomického, ale i bezpečnostního, protože koroze může zapříčinit vznik nehody, která především v automobilové a letecké dopravě může ohrozit lidské životy. Nutná je tedy pravidelná kontrola strojů a zaznamenávání rychlosti šíření koroze. Koroze probíhá také u chemicky heterogenních materiálů. [1]

Největší podíl hliníku je v letectví, díky nízké hmotnosti a dobrým mechanickým vlastnostem i při teplotách pod bodem mrazu. Je zde sice snaha nahradit některé hliníkové součásti materiály ještě lehčími, jako je hořčík nebo uhlíková či skleněná vlákna, což však nelze v oblastech největšího namáhání, (trup a křídla). Na tyto části letadla jsou používány především tvářené slitiny mající lepší pevnostní vlastnosti. Např. AlMgSiCu (AA 6013), AlMgSc , AlMgLi (1424) a AlCuMg2 (AA 2024), spojování hliníkových částí lze nýtováním nebo svařováním, (bodové, laserové a třecí). [1]

Protože má kubickou plošně středěnou mřížku (FCC), má dobré plastické vlastnosti jak za tepla, tak i za studena. Některé součásti se proto vyrábějí pomocí protlačování. Nedostatkem u slitin hliníku oproti slitinám oceli je jeho tvrdost, která nedosahuje vysokých hodnot, proto je nutné dbát zvýšené pozornosti na

povrch výrobku při jeho opracování. Výhoda je, že slitiny hliníku se stejnou tvrdostí, jakou mají některé slitiny oceli, lze lépe obrábět. Obrobitelnost se mění dle struktury, čistý hliník lze obrábět hůře, než jeho slitiny, je to dáno precipitáty a stupněm deformačního zpevnění. Také nastává problém u mechanického leštění, při kterém dochází k mazání materiálu. Slitiny mohou být napadeny elektrochemickou korozí, jsou-li v konstrukci ve vodivém styku s ostatními kovy a slitinami, výjimku tvoří zinek a kadmium. [1]

Výroba a surovinové zdroje pro výrobu hliníku

Hliník patří mezi nejrozšířenější prvky v zemské kůře. Je stříbřitě bílý a lesklý. V přírodě se hliník vyskytuje ve více jak 250 různých minerálech, ale pro jeho výrobu jsou nejdůležitější korund, diaspor, boehmit, spinel, gibbsit, kyanit, andalusit, silimanit (tab. 2) [1]

Tab.2 - běžné minerály hliníku

Minerál	Chemický vzorec	Hmot. % Al_2O_3
korund	Al_2O_3	100
diaspor, boehmit	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	85
spinel	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$	71
gibbsit	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	65,4
kyanit, andalusit, silimanit	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$	63

Nejdůležitější rudou pro výrobu hliníku je bauxit. Tato hornina se skládá především z hydratovaných oxidů hliníku, především gibbsitu, boehmitu a diasporu. Bauxit se nachází především v tropech a oblastech s dobrým odvodněním. Výroba hliníku probíhá ve dvou fázích. Prvním stupněm je výroba oxidu hlinitého ze zmíněného bauxitu a druhým stupněm elektrolýza z taveniny oxidu hlinitého a kryolitu v tzv. elektrolyzérech. Elektrolyzér je pec, která má dno tvořené uhlíkovou katodou. Do pece se přidává roztavený kryolit a poté je vložena uhlíková anoda. Nakonec se postupně přidává oxid hlinitý, který je díky elektrickému proudu rozkládán na čistý hliník a kyslík. [1]

Vývoj slitin hliníku

Dnes se již nepředpokládá vývoj slitin z hlediska chemického složení, spíše se orientujeme na zlepšování postupů při zpracování a to především tepelného zpracování. Nové postupy by měly být zaměřeny na zvýšení lomové houževnatosti, tvárnosti, odolnosti proti korozi či snížení vrubové citlivosti. Důležitou roli hraje také výběr správného chladicího prostředku a jeho teploty, jenž může vést ke snížení vnitřního pnutí a následného borcení složitějších součástí. Dalším problémem je vysoká energetická spotřeba při výrobě hliníku a tím i velký dopad na životní prostředí. [1]

Hliník patří do skupiny neželezných kovů, spolu s neželeznými slitinami tvoří neželezné kovy přibližně pouze 5% z celosvětové produkce a spotřeby kovových materiálů. I přes relativně malý podíl však hrají důležitou roli díky specifickým vlastnostem. [1]

Rychlý rozvoj slitin hliníku má za následek výhodná kombinace fyzikálních, (tepelná a elektrická vodivost a dobrá svařitelnost), mechanických, chemických, (slitiny jenž neobsahují měď, dobře odolávají korozi, příčinou je slabá ochranná vrstva o tloušťce 5-20nm) a technologických vlastností, (tváření za tepla i za studena). [1]

Značení hliníku a slitin hliníku

Hliník a jeho slitiny se může značit buď podle českých, nebo evropských norem. U českých norem ČSN se za značením ČSN přidává šest číslic. Třída norem 40-45 je dána pro hliník a jeho slitiny na odlitky a tvářené výrobky. Třída 42 je zaměřena na hutnictví. Číselné značení lze doplnit i chemickým označením. Jiná možnost, v technické praxi používanější, je použití evropské normy ČSN EN 573-1 až 3, zde se označení doplňuje čtyřmístnou (u tvářených materiálů), resp. pětimístnou číslicí (netvářené). Toto číselné označení doplňuje chemické označení podle chemických značek. Následující číslice udávají čistotu hliníku nebo obsahy příslušných prvků. Chemické označení je pouze doplňkové. [1]

Normy ČSN EN 573-1 platí pro tvářené součásti. Označování se děje písmeny EN Ax a čtyřmi číslicemi, popř. chemickým složením. Např.: EN AW-5052 [AlMg2.5]

První písmeno za EN, tedy písmeno A, označuje hliník a jeho slitiny. Druhé písmeno za EN, tedy písmeno W, určuje že jde o tvářené výrobky. [1]

Tab. 3 – rozdělení skupin podle první číslice (podle hlavních prvků).

Řada	Slitina
1000	Al \geq 99%
2000	AlCu
3000	AlMn
4000	AlSi
5000	AlMg
6000	AlMgSi
7000	AlZn
8000	Al s jinými prvky

Další možnosti druhého písmene jsou B, C, M.

B – ingoty, C- odlitky, M- předslitiny

Mechanické vlastnosti

Mezi základní mechanické vlastnosti, které rozhodují u výběru materiálu pro daný účel, patří zkouška tahem, tlakem, zkoušky tvrdosti a zkoušky rázem v ohybu. Definice těchto mechanických charakteristik i způsob provedení zkoušek jsou uvedeny v evropských normách převzatých do českých (ČSN EN 10 002-1, ČSN EN 10 003-1, resp. ČSN EN 10 045-1). [1]

Tab. 4 - základní vlastnosti hliníku

Vlastnosti	Al
Měrná hmotnost	2669 kg/m ³
Mřížka	FCC
Parametr mřížky	a= 0,404958nm
Teplota tání	660,4°C
Teplota varu	2494°C
Tepelná vodivost (25°C)	247W/m*K
R_m^{\max}	40 - 750MPa
Spalné teplo	31,05MJ/kg

Mechanické vlastnosti hliníku, slitin hliníku a jiných kovů

Mez pevnosti R_m čistého hliníku je malá, zhruba 40 – 50 MPa, při tažnosti $A = 70 - 90 \%$. Pevnost se dá zvýšit tepelným zpracováním deformačním, precipitačním (vytvrzováním), substitučním nebo disperzním zpevněním. Tvářené slitiny mají oproti slévarenským slitinám lepší pevnostní charakteristiky, neboť mají homogennější strukturu, neobsahují póry a mají drobnější zrna.

Pevnost klesá s rostoucí teplotou, zatímco tažnost a kontrakce rostou. Ponechání při zvýšené teplotě může vést k změně struktury a pevnost může zůstat snížena i při následném ochlazení na pokojovou teplotu, tzv. odpevňování. U hliníkových slitin mez pevnosti a tvrdost, při zvyšující se teplotě, poměrně rychle klesá. Na druhou stranu se zvyšuje tažnost a kontrakce. Za teplot snížených mají slitiny hliníku, (stejně jako většina neželezných slitin) někdy dokonce lepší mechanické vlastnosti, než při teplotách pokojových. Vlastnosti u slitin hliníku lze vylepšit pomocí přidání legujících prvků. Například legury mědi (Cu) a hořčíku (Mg) mají pozitivní vliv na pevnost. [1]

Precipitačního zpevnění

Nejúčinnější typ zpevnění je dosaženo u slitin hliníku pomocí precipitačního zpevnění při tepelném zpracování, které tvoří rozpouštěcí žíhání (skládá se z ohřevu na rozpouštěcí teplotu, rozpuštění intermetalických fází v tuhém roztoku díky výdrži na rozpouštěcí teplotě a rychlého ochlazení k dosažení přesyceného tuhého roztoku) a přirozené, nebo umělé stárnutí (vliv teploty na rychlost stárnutí a konečný stav pevnosti po stárnutí). Pro slitinu Al-Cu-Mg se doporučuje stárnutí při pokojové teplotě, tedy přirozené stárnutí. Podmínkou pro vytvrzování slitin je výrazná změna rozpustnosti v tuhém stavu. Díky tomuto ději dochází ke změně mechanických, fyzikálních i technologických vlastností slitin. Pro precipitační

zpevnění je zejména vhodné využití Al-Mg-Si(6xxx), Al-Cu-Mg(2xxx) a Al-Zn-Mg-Cu(7xxx). Další vliv na zpevnění, ale i jiné mechanické vlastnosti, jako například odolnost proti korozi a jiné, mají prvky Li (do 2%), Ag a Sc (desetiny procent).

Slitiny AlCuMg

Slitina AlCu₄Mg, obchodním názvem dural, se vyznačují slabou korozní odolností, dochází u nich k mezikrystalické korozi, podléhají koroznímu praskání i při atmosférických podmínkách, proto je nutná povrchová úprava a to pokrýváním vrstvou Al o vysoké čistotě, nebo slitinami AlSiMg. Duraly se vyznačují vysokou pevností, $R_m = 530 \text{ MPa}$, lze je totiž precipitačně zpevňovat, což vede ke zvýšení jejich pevnostních charakteristik, ale současně dochází ke snížení charakteristik deformačních. V průmyslové praxi lze duraly používat do značně omezené teploty, zhruba 250°C. Při hodnotě Cu mezi 4 až 4,8 hm.% je dosahována maximální pevnost po vytvrzení. Pro zlepšení tvárnosti se množství Cu pohybuje v polovičních hodnotách, tedy mezi 2 až 2,4 hm.%. Hořčík ve slitinách duralu umožňuje precipitační vytvrzení a zvyšuje pevnost po vytvrzení. Obsah hořčíku je různý u jednotlivých druhů slitin, hodnoty se pohybují od 0,4 do 1,8 hm.%. Při vyšších hodnotách hořčíku mluvíme o tzv. superduralu (AlCu₄Mg₁).[3,7]

Legury slitin hliníku

Měď (Cu) patří mezi ušlechtilé kovy, má vytvrzovací účinky a zlepšuje pevnostní charakteristiky, ale zároveň snižuje odolnost proti korozi, proto se leguje spolu s jinými kovy (např. Mg). Standardní elektrochemický potenciál mědi je + 0,35 až +0,52 V.

Hořčík (Mg) dodává lepší pevnostní charakteristiky u slitin AlMgSi a AlCuMg. Nevýhodou může být vznik interkrystalické koroze v důsledku možného vyloučení precipitátů Mg₅Al₃ nebo Mg₅Al₈ na hranicích zrn.

Zinek (Zn) je hlavní legující přísadou při tepelném zpracování.

Mangan (Mn) ve slitinách hliníku zvyšuje rekrytalizační teplotu a pevnostní charakteristiky, dále snižuje teplotu kalení a zjemňuje zrna. Mangan u slitin hliníku kompenzuje legury železa, které mají negativní vliv na tvárnost.[7]

Chemické vlastnosti hliníku a jeho slitin

Hliník patří mezi elektronegativní kovy, jeho standardní rovnovážný potenciál E^0 je -1,662 V. Vyznačuje se vysokou korozní odolností ve vodě, neutrálních a slabě kyselých roztocích a atmosféře v důsledku pasivování. V přírodě se vyskytuje hliník pouze jako jeden izotop. Hliník má tři valenční elektrony, což má za následek, že ve sloučeninách se vyskytuje výhradně v oxidačním stavu Al^{III}. Záporný elektrodový potenciál ukazuje relativně nízkou ušlechtilost (vysoká tendence tvořit ionty Al³⁺ v roztoku). Hliník má dobrou schopnost slučovat se s kyslíkem, tento jev je využíván k redukci při výrobě kovů. Lepší chemické vlastnosti lze docílit přidáním legur. Například příměs stříbra (Ag) zvyšuje odolnost proti elektrochemické korozi. [1,4]

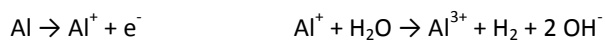
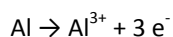
Tab. 5 – Porovnání hliníku s ostatními kovy podle ušlechtilosti

Kov	Li	K	Ca	Na	Mg	Al	Zn	Fe	Sn	Pb	Cu	Ag	Hg
E^0 [V]	-3,045	-2,925	-2,866	-2,714	-2,363	-1,662	-0,763	-0,440	-0,136	-0,126	+0,337	+0,799	+0,854

Korozní vlastnosti hliníku a jeho slitin

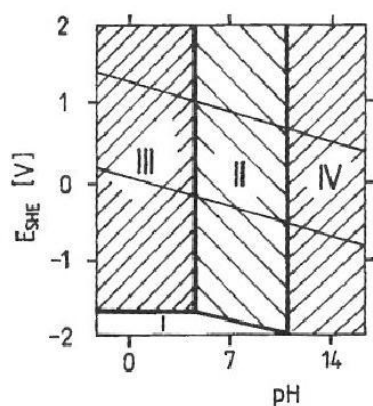
Koroze je chemický, nebo fyzikálněchemický jev, při kterém dochází k narušování povrchu materiálu, tvorbu korozních zplodin a tím ke snížení mechanických vlastností. Mezi fyzikální vlivy patří abraze, eroze či opotřebení. Na korozi má také vliv prostředí, teplota, tlak a vlhkost. [1,4]

Hliník má vysokou odolnost proti korozi, a to především v atmosférických podmínkách. Vysoká odolnost má ale řadu omezení, například při ponoření do elektrolytu dojde k anodovému rozpouštění Al a vzniká Al^{3+} a také Al^+ , který následně reaguje s vodou:



Příčinou koroze jsou samovolné děje mezi materiálem a prostředím. Z pohledu termodynamiky je koroze způsobena tzv. termodynamickou nestálostí kovů v různých prostředích, spojená s jejich přeměnou do stálejšího stavu zplodin koroze. Množství energie, které se může při korozi uvolnit, udává míru pravděpodobnosti koroze. V praxi může termodynamika určit podmínky, při kterých je koroze možná. Příkladem termodynamických výpočtů jsou diagramy potenciál – pH podle Pourbaixa. Diagram je rozdělen na 4 části. V oblasti imunity je koroze vyloučena, v pasivní oblasti je zpomalena díky stabilním, málo rozpustným zplodinám. V oblasti aktivity a transpasivity dochází k intenzivní korozi kovů.[1]

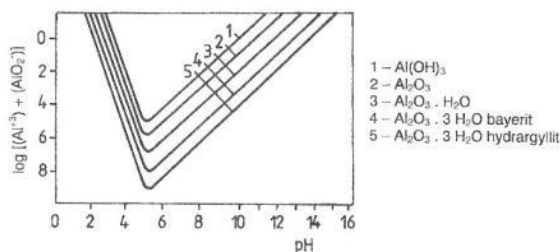
Obr. 1 – Pourbaix diagram pro systém Al – H₂O



I – oblast imunity, II – oblast pasivity, III – oblast aktivity, IV – oblast transpasivity

Na povrchu hliníku se v oblasti pasivity tvoří nerozpustná vrstva Al_2O_3 . Tloušťka této vrstvy závisí na podmínkách prostředí a zvyšuje hodnotu elektrodového potenciálu. Nejmenší rozpustnost korozních zplodin je při $\text{pH} = 5$.

Obr 2. – Vliv pH elektrolytu na rozpustnost korozních zplodin Al.



Vliv chemického složení na korozi

Dalo by se říct, že nejlepší odolnost proti korozi má samotný čistý hliník. Výjimku tvoří pouze Mn, který při tavení slitiny váže na sebe železo a tak zabraňuje korozi. Zbytek příměsí (Na, Ce, Co, Pt, Ag, Th, V, Hg, Ca, občas i Cr, Sn a Cd) tvoří vůči Al katodu. V tabulce 7 je uvedena rychlost koroze Al různé technické čistoty v 0,3 mol/l NaOH žíhaného při teplotě 30°C.[1,6]

Tab. 6

Čistota [%]	99,998	99,990	99,97	99,57	99,20
Rychlost koroze [$\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$]	7,7	28,6	36,3	53,3	664,4

U korozní odolnosti technicky používaných slitin je důležité, zda tyto slitiny obsahují Cu nebo ne. Slitiny bez Cu mají obdobné korozní vlastnosti, jako má čistý hliník. U slitin s Cu se při vyšších nárocích na odolnost proti korozi používá plátování čistým hliníkem nebo slitinou Al-Zn. [1,6]

Vliv korozního prostředí

Podle typu prostředí, můžeme korozi rozdělit na čtyři základní druhy

- 1) atmosférická koroze
- 2) koroze v kapalinách
- 3) koroze v plynech
- 4) koroze v půdách

Atmosférická koroze

Koroze v atmosféře je nejběžnější typem koroze, způsobuje až 70 % všech korozních ztrát. Její charakter je elektrochemický a rychlost korozního napadení závisí na agresivitě prostředí, tj. především na stupni odvlhčení (tloušťka kondenzované vrstvy), ve kterém se materiál nachází a také na jeho chemickém

složení. Pasivace probíhá při nižší agresivitě u slitin neobsahujících Cu, Zn nebo Ni. Při vyšší agresivitě dochází ke vzniku mělké důlkové koroze. Tuto korozi dále podporuje přítomnost mědi a zinku. Rychlost atmosférické koroze závisí také na nečistotách atmosféry, k nejagresivnějším znečištěním patří SO_2 , NaCl, chlorovodík, oxidy dusíku...[1,6].

Koroze ve vodě

Intenzita koroze v kapalinách je ovlivněna chemickými látkami rozpuštěnými ve vodě. Koroze v kapalinách probíhá elektrochemicky, ale vliv mají také neelektrochemické děje, jako např. chemické děje v roztoku, mechanické nečistoty, kavitace, vliv mikroorganismů apod. Koroze ve vodě velmi závisí na přítomnosti a obsahu kyslíku. U slitin hliníku však nemá kyslík tak velký vliv jako u jiných prvků, neboť se tvoří vrstva Al_2O_3 . Pokud ale teplota vody bude vyšší než 100 °C, na povrchu kovu se nebude vytvářet vrstva ochranná, ale vrstva korozních zplodin. Dochází pak k rovnoměrné korozi a může dojít i k mezikrystalické korozi. Intenzivní rovnoměrná koroze je způsobována také vysokou kyselostí či zásaditostí vody. [1, 6].

Koroze v roztocích solí

Koroze v roztocích solí se řídí podle pH a podle povahy kationtů a aniontů v těchto roztocích obsažených. U hliníku působí nejagresivněji anionty chloridu, tyto anionty jsou totiž dosti malé na to, aby prostoupili i skrz póry a poškozená místa oxidické vrstvy. Negativní vliv mají i kationty, k nejagresivnějším patří zejména kationty K^+ , Na^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} a Mg^{2+} [1].

koroze se dá rozdělit podle pasivované vrstvy:

- napadení je slabé, pasivní vrstva je rovnoměrná a brání další korozi
- na hranicích zrn, nebo na porušených místech pasivní vrstvy vzniká lokální napadení, v těchto místech může docházet k posuvu koroze dále do materiálu
- rozpouštění pasivní vrstvy působením prostředí

Ochranná oxidická vrstva může být porušena

- působením některých aniontů v korozním prostředí, nebo různorodostí struktury pasivní vrstvy (bodová koroze, mezikrystalická, po vrstvách)
- působením napětím (vibrační koroze, při tahovém statickém napětí korozní praskání, při cyklickém zatěžování ke korozní únavě)

Bodová koroze

Bodová koroze souvisí s lokálním porušením oxidické vrstvy při potenciálu průrazu. Hliník má dosti záporný potenciál (-0,45V v 0,1mol* l^{-1} NaCl), proto odolnost jeho slitin závisí na jeho pasivním stavu. Tento stav závisí na aniontech elektrolytu, které tento druh koroze zapříčiňují. Jsou to anionty Cl^- , B^- , J^- , ty

pronikají do struktury pomocí defektů v povrchu a vytváří lokální mikroanody. Bodová koroze je nejběžnější a na jejím základě a dalších podmínkách vznikají další specifické druhy koroze. [1,5]

Mezikrystalická koroze

U hliníkových slitin dochází k mezikrystalické korozi pouze u rekrystalizovaných struktur a to především z bodové koroze. Jedná se o pasivaci zrn tuhého roztoku, kdy aktivátorem jsou sekundární fáze vyloučené na hranici zrn. Sekundární fáze mohou být buď jako katody, např. CuAl_2 , nebo jako Anody, např. MgAl_3 . Mezikrystalickou korozi můžeme pozorovat i ve vodě při teplotě vyšší jak 160°C . Příčinou je adsorpce příměsí na hranicích zrna, příměsi se projevují jako katody a dávají vzniku OH^- , jenž narušují pasivní stav hranic. [1,5,6]

Koroze po vrstvách

Tento typ koroze vzniká u výkovků a vývalků ze slitin hliníku a to rovnoběžně podél deformovaného povrchu. Vznik trhlin se děje také rovnoběžně, jako důsledek objemového účinku vznikajících korozních zplodin. Koroze po vrstvách může probíhat jak po hranicích zrn, tak po deformovaných hranicích dendritů nebo transkrystalicky. Tato koroze je typická pro vysokolegované slitiny, její rychlost je na rozdíl od jiných druhů koroze konstantní a dochází ke korozi i za atmosférických podmínek. Především prvky Fe, Cr a Mn snižují odolnost proti korozi a jsou typické pro korozi po vrstvách. Závisí také na způsobu tepelného zpracování. Slabou odolnost vůči korozi mají například čerstvě zakalené součásti. [1,5,6]

Korozní praskání

Korozní praskání je důsledkem mechanického namáhání a koroze (často bodová koroze) a vzniká kolmo k působícímu tahovému napětí. Praskliny vznikají mezikrystalicky, transkrystalicky nebo smíšeně. Čistý hliník koroznímu praskání nepodléhá, naopak dosti náchylné jsou slitiny AlCuMg . Nepříznivý vliv na korozní praskání mají některé legury, např. Mg nebo některé způsoby tepelného zpracování, např. stárnutí za teplot $160 - 205^\circ\text{C}$. [1,5]

Korozní únava

Korozní únava nastává u cyklicky zatěžovaných materiálů a to ve všech typech elektrolytů, trhliny se šíří transkrystalicky i interkrystalicky. Pro všechny kovy platí, že mez korozní únavy je menší než mez únavy na vzduchu. [1,5]

Vibrační koroze

Vibrační koroze vzniká při kombinaci oxidace adheze a abrazivního působení za působení kmitání s rozlišnou frekvencí a amplitudou. Často se vyskytuje u šroubových, nýtovaných nebo čepových spojů u hliníku a jeho slitin. K vibrační korozi dochází pouze v oxidačním prostředí, při oddělení malých částí ochranné pasivní vrstvy. [1,5,6]

Kontaktní koroze

Hliník má nízký korozní potenciál a v elektrolytech společně při vodivém styku s ušlechtlejším kovem dochází ke zvýšení rychlosti koroze. Velmi negativní vliv na hliník má měď, která nemusí být v přímém styku s hliníkem, stačí aby se její ionty nacházely v elektrolytu společně s hliníkem. Ionty se navážou na hliník a chovají se jako mikrokatomy, což vede k bodové korozi. Atmosférická koroze je také důležitá a to u prvků do vzdálenosti 5 mm. Vliv atmosférické koroze roste s agresivitou ovzduší, především v přímořských oblastech. Při kontaktu hliníku se zinkem dochází k urychlování koroze zinku, což je nebezpečné pro pozinkované plechy. [1,5]

Zkouška solnou mlhou

Předmět normy ČSN EN ISO 9227

„Tato mezinárodní norma stanoví přístroje, chemikálie a postup pro zkoušky v mlze neutrálního roztoku chloridu sodného (NSS), v mlze okyseleného roztoku chloridu sodného (AASS) a v mlze okyseleného roztoku chloridu sodného a chloridu měďnatého (CASS), kterými se zjišťuje protikorozní odolnost kovových materiálů jak nechráněných, tak i s ochrannými povlaky nebo s dočasnou protikorozní ochranou.¹“

Rozměry zkušebních vzorků ani doba zkoušení nejsou určeny normou. Pro zkoušení dekorativních povlaků dekorativních povlaků Cu+Ni+Cr a pro anodickou oxidaci hliníku je vhodné použít buď okyselený roztok chloridu sodného, nebo okyselený roztok chloridu sodného a chloridu měďnatého. Pro zkoušení dekorativních povlaků Ni+Cr se doporučuje použití pouze okyselený roztok chloridu sodného a chloridu měďnatého. Z hlediska korozní odolnosti nelze navzájem srovnávat odlišné materiály. [2]

Zkoušky

U zkoušky NSS se pH solného roztoku upraví tak, aby hodnota rozprašovaného roztoku ve zkušební komoře při teplotě $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ byla v rozmezí 6,5 - 7,2. Změnu pH lze ovlivnit snížením oxidu uhličitého a to přípravou roztoku z převařené vody, nebo zahřátím nad 35°C před přivedením do přístroje. Kontrola probíhá s přesností do 0,3 pH.

U zkoušky AASS se pH upravuje na hodnotu 3,1 – 3,3 pomocí ledové kyseliny octové. Kontrola probíhá s přesností do 0,1 pH.

U zkoušky CASS se rozpouští dihydrát chloridu měďnatého v chloridu sodném, tak aby byla koncentrace $0,26\text{g/l} \pm 0,02\text{g/l}$. Hodnoty pH se upraví stejným způsobem jako u zkoušky NSS. [2]

Zkušební zařízení

Samotné zkušební zařízení musí být chráněno proti korozi, zkušební komora musí být větší než $0,4\text{m}^3$, musí být docílena homogenita rozprašování a tvar komory musí být takový, aby zkondenzovaný roztok neovlivňoval vzorky. Teplota v komoře se musí pohybovat podle tabulky 8.

Tab. 7 - Teploty v komoře pro dané tlaky

Tlak v rozprašovači kPa	Teplota ve $^{\circ}\text{C}$ v sytící věži	
	(NSS) a (AASS)	(CASS)
70	45	61
140	52	69

¹ ČSN EN ISO 9227 (03 8132): Korozní zkoušky v umělých atmosférách – Zkoušky solnou mlhou. Praha, Český normalizační institut, 2007. 6 s.

V komoře, ve které se konala zkouška jiného složení roztoku, než jaké je určené pro zkoušku NSS, se již nedoporučuje provádět zkoušku NSS, pokud je to nezbytné, tak je nutné důkladné vyčištění a zkontrolování hodnoty pH v komoře. [2]

Hodnocení korozní agresivity zkušebního prostoru

Zkouška NSS

K ověření této zkoušky se používají vzorky 150 mm x 70 mm a tloušťky 1 mm \pm 0,2 mm, materiál vzorku je ocel válcovaná za studena CR4 podle ISO 3574. Vzorky musí být nenabarvené, očištěné, s neporušeným povrchem a jejich hmotnost změřena na \pm 1 mg. Jedna strana vzorků je pokryta snímacím povlakem (plastová fólie). Je potřeba čtyři až šest vzorků, ty se rozmístí nechráněnou stranou nahoru do celého prostoru zkušebního zařízení a to do výšky sběrného zařízení pod úhlem 15° až 25° ke svislici. Kontrola probíhá po dobu 48 h.

Na konci zkoušky se sejme ochranný povlak a následuje čištění koroze podle ISO 8407. Vzorky se poté zváží a přepočte se úbytek hmotnosti na čtvereční metr. Pokud úbytek hmotnosti každého ze vzorku činí $70 \pm 20 \text{ gm}^{-2}$, pak zkušební zařízení vyhovuje. [2]

Zkouška AASS

K ověření této zkoušky se používají vzorky 150 mm x 70 mm a tloušťky 1 mm \pm 0,2 mm, materiál vzorku je ocel válcovaná za studena CR4 podle ISO 3574. Vzorky musí být nenabarvené, očištěné, s neporušeným povrchem a jejich hmotnost změřena na \pm 1 mg. Jedna strana vzorků je pokryta snímacím povlakem (plastová fólie). Je potřeba čtyři až šest vzorků, ty se rozmístí nechráněnou stranou nahoru do celého prostoru zkušebního zařízení a to do výšky sběrného zařízení pod úhlem 15° až 25° ke svislici. Kontrola probíhá po dobu 24 h.

Na konci zkoušky se sejme ochranný povlak a následuje čištění koroze podle ISO 8407. Vzorky se poté zváží a přepočte se úbytek hmotnosti na čtvereční metr. Pokud úbytek hmotnosti každého ze vzorku činí $40 \pm 10 \text{ gm}^{-2}$, pak zkušební zařízení vyhovuje. [2]

Zkouška CASS

K ověření této zkoušky se používají vzorky 150 mm x 70 mm a tloušťky 1 mm \pm 0,2 mm, materiál vzorku je ocel válcovaná za studena CR4 podle ISO 3574. Vzorky musí být nenabarvené, očištěné, s neporušeným povrchem a jejich hmotnost změřena na \pm 1 mg. Jedna strana vzorků je pokryta snímacím povlakem (plastová fólie). Je potřeba čtyři až šest vzorků, ty se rozmístí nechráněnou stranou nahoru do celého prostoru zkušebního zařízení a to do výšky sběrného zařízení pod úhlem 15° až 25° ke svislici. Kontrola probíhá po dobu 24 h.

Na konci zkoušky se sejme ochranný povlak a následuje čištění koroze podle ISO 8407. Vzorky se poté zváží a přepočte se úbytek hmotnosti na čtvereční metr. Pokud úbytek hmotnosti každého ze vzorku činí $55 \pm 15 \text{ gm}^{-2}$, pak zkušební zařízení vyhovuje. [2]

Podmínky při zkoušce

Před samotnou zkouškou se ověří rychlost hromadění v prázdné komoře, nebo zaplněné modelovými vzorky. Hodnoty každého sběrného zařízení musí být v rozmezí (viz. Tab. 8).

Tab. 8 - Zkušební podmínky

Parametry zkušební zkoušky	NSS	AASS	CASS
Teplota	$35^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$	$35^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$	$50^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$
Průměrná rychlost hromadění rozprašované mlhy z vodorovné sběrné plochy 80cm^2	$1,5\text{ml/h} \pm 0,5\text{ml/h}$		
Koncentrace roztoku NaCl (v nahromaděném roztoku)	$50 \text{ g/l} \pm 5 \text{ g/l}$		
pH (v nahromaděném roztoku)	6,5 až 7,2	3,1 až 3,3	3,1 až 3,3

Průměrnou rychlost hromadění rozprašované mlhy lze počítat pro časový úsek větší jak 24 hodin. Po celou dobu zkoušky by nemělo docházet k přemísťování vzorků a k otevírání komory (pokud to není nezbytně nutné například pro kontrolu vzorků, nebo pro doplnění zásobníku zkušební roztoku). [2]

Zpracování a vyhodnocení vzorků

Po skončení zkoušky se vzorky nechají oschnout (0,5 až 1 hodina) a odstraní se zbytky rozprašeného roztoku oplachováním nebo ponořením do čisté tekoucí vody. Protokol zkoušky se skládá z výsledků zkoušky a to jak průměrné hodnoty, tak i jednotlivých zkušebních vzorků.

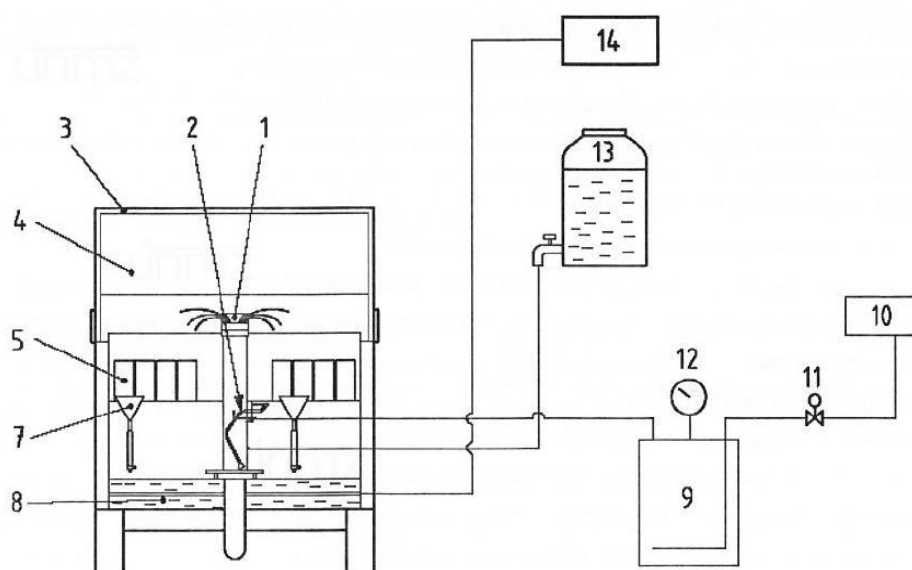
Existuje mnoho způsobů porovnávání vzorků:

- Vzhled po zkoušce
- Vzhled po odstranění koroze
- Množství a rozložení korozních vad, tj. bodů, trhlin, puchýřů, zkorodování a podkorodování v místě řezu u povlaků
- Doba před vznikem první koroze
- Úbytek hmotnosti
- Zjištěné mikrometrické změny
- Změny mechanických vlastností

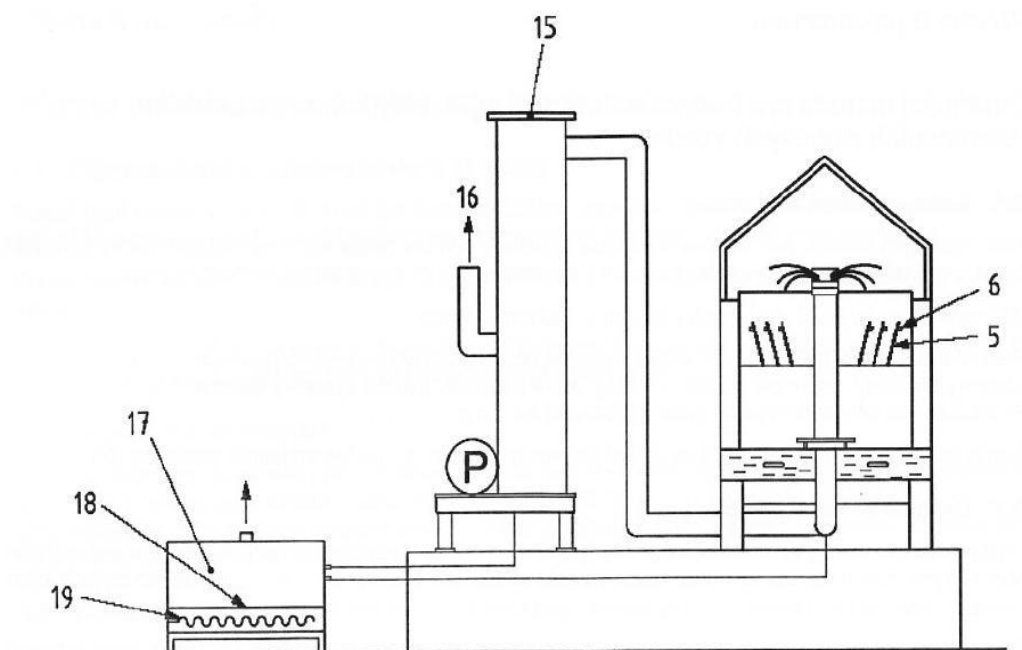
Protokol o zkoušce musí obsahovat údaje o zkušebním postupu. Tyto údaje se mohou podle účelu zkoušky a stanovených požadavků lišit, obecně musí obsahovat tyto údaje: [2]

- a) Odkaz na normu ČSN EN ISO 9227
- b) Typ a čistota chemikálií i vody
- c) Popis výrobku (materiálu), který má být zkoušen
- d) Čištění a vlastnosti povrchu velikost vzorku, a ochrana jeho vybraných částí.
- e) Počet vzorků
- f) Doba zkoušky, pokud po dobu zkoušky došlo ke kontrole tak i mezivýsledky a intervaly kontrol
- g) Zkušební teplota
- h) Množství nahromaděného roztoku a koncentraci chloridu
- i) pH nahromaděného a zkušebního roztoku
- j) údaje o rychlosti koroze pomocí hmotnostního úbytku v g/m^2

Obr 3. –Schéma komory s úpravou vypouštěné solné mlhy a odpadní vody – nárys



Obr 4. - Schéma komory s úpravou vypouštěné solné mlhy a odpadní vody – bokorys



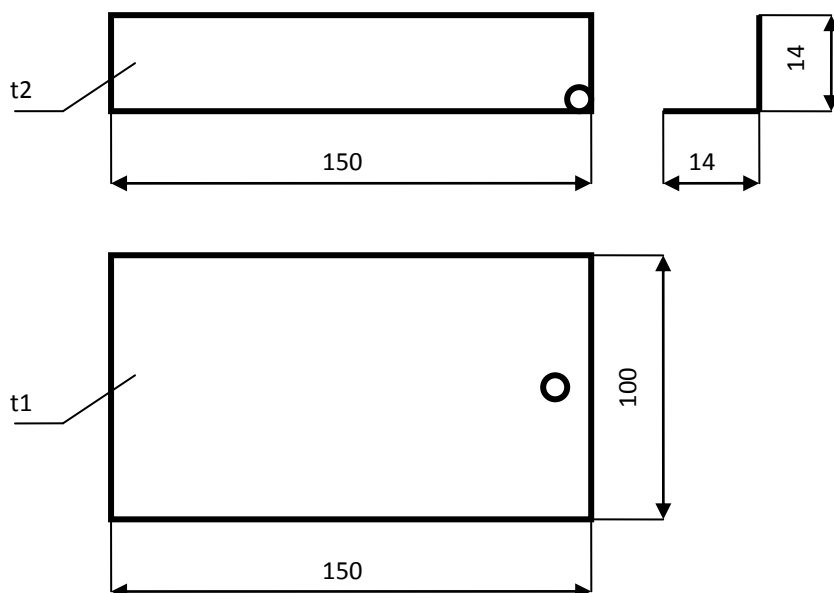
- | | |
|------------------------------|----------------------------------|
| 1. Věž pro rozprašování mlhy | 11. Elektromagnetický ventil |
| 2. Rozprašovač | 12. Tlakoměr |
| 3. Víko | 13. Zásobník zkušební vzorku |
| 4. Zkušební komora | 14. Regulace teploty |
| 5. Zkušební vzorek | 15. Úprava vypouštěné solné mlhy |
| 6. Držák zkušebních vzorků | 16. Odtah vzduchu |
| 7. Sběrné zařízení | 17. Vypouštění odpadní vody |
| 8. Komora | 18. Nádrž solného roztoku |
| 9. Sycení vzduchu | 19. Topení |
| 10. Kompresor vzduchu | |

Materiál pro experiment

Vzorky byly odebrány z potahového plechu modelu draku letadla a z výztuhy pláště. Sledování probíhalo v korozním prostředí solné mlhy. Rozměry zkoušených vzorků byly u plechu 150 x 100 x 1 mm a úhelníku (tvar L) o stranách 14 x 14 mm a délky 150 mm, tloušťka úhelníků je 2 mm. Plechy jsou tvořeny z hliníkové slitiny typu AlCu4Mg1, na jehož povrch byla naplátovaná za tepla vrstva hliníku (plech s povrchovou úpravou materiálu – s PUM). Tloušťka povrchové vrstvy byla změřena na průměrnou hodnotu 40,7 μm. U úhelníku se

jednalo rovněž o slitinu AlCu4Mg1 (úhelník bez povrchové úpravy materiálu – bez PUM). Vzorky jsou vytvrzeny.[7]

schéma jednotlivých zkušebních vzorků včetně rozměrů:



Označení materiálů, směrné složení a výsledky chemických analýz uvedeny v tab. 9

Tab.9 Směrné chemické složení vzorků plechu a úhelníku [hm.%]

Označ. vzorku			Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Sn	Ni
Úhelník	ČSN 424203.61	min	0	0	0	0,4	1,2	0	0	0	0	0
		max	0,5	0,5	0	1,1	1,8	0	0,2	0,2	0	0,1
Plech	GOST D16 ATV	min	0	0	3,8	0,3	1,2	0	0	0	0	0
		max	0,5	0,5	4,9	0,9	1,8	0,1	0,25	0,15	0	0

Tab. 10 Chemické analýza vzorků plechu a úhelníku použitých pro experiment [hm.%]

Označ. vzorku	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Sn
Úhelník	0,21	0,31	4,1	1,08	1,71	0,00	0,03	0,02	0,00
Plech - povrch	0,12	0,20	0,01	0,00	0,01	0,00	0,02	0,02	0,01
Plech - střed	0,19	0,21	4,4	0,44	1,69	0,01	0,03	0,04	0,01

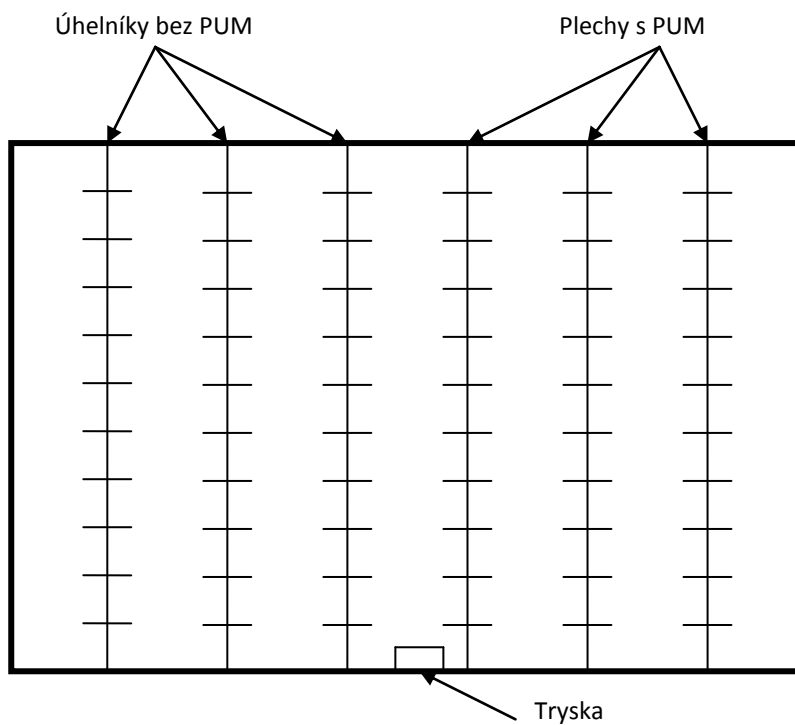
Pro experiment bylo použito zařízení typu DCTC 600 (obr. 5), toto zkušební zařízení obsahuje ohřívací systém, rozprašovací a sběrná zařízení a má možnost kontroly teploty.

Obr. 5 Korozní komora DCTC 600; 1- víko, 2-zásobník solného roztoku, 3- hladina roztoku, 4- ovládací panel, 5- vypínač, 6-průtokoměr roztoku soli, 7-nastavitelné stopy, 8- řídicí jednotka, 9-zkušební prostor (komora)



Zkušební vzorky a jejich uspořádání

Vzorky byly uchyceny pomocí nylonové nitě na dřevěné tyči. Vzorky bez povrchové úpravy byly umístěny v levé části komory a s povrchovou ochranou v pravé. Na jedné tyči bylo zavěšeno 5 úhelníků a 5 plechů a vždy se vzorky střídaly.[7]



Doba trvání zkoušky je dána zkoušeným materiálem nebo výrobkem. Pokud není tato doba stanovena, pak závisí na dohodě zúčastněných stran.

Stanovení hmotnostních úbytků a korozní rychlosti

Vzorky se zváží před a po zkoušce s přesností na 0,1 mg. Pro stanovení hmotnostního úbytku kovu [g/m²] se zjištěný úbytek vydělí plochou exponovaného povrchu zkušební vzorku.

Korozní rychlost získáme z podílu úbytku hmotnosti a doby expozice v kondenzační komoře

$$v_k = \frac{V/S}{\text{doba expozice}} \cdot \text{hodiny v roce}$$

v_k = korozní rychlost [mm/rok], V = objemový úbytek materiálu, S = plocha exponovaných vzorků.[7]

Experimentální data

Experimentální data pro hliníkové plechy:

Čas expozice (h)	Hmotnostní úbytek (experimentální data)	Hmotnostní úbytek (průměrná hodnota)	Korozní rychlost [mm/rok]	Korozní rychlost (průměrná hodnota) [μm/rok]
48	0,283 0,233 0,357 0,280 0,290	0,28867	0,01916 0,01578 0,02412 0,01893 0,01961	19,52
96	0,607 0,910 0,870 0,787 0,793	0,79333	0,02051 0,03077 0,02941 0,02660 0,02682	26,82
240	1,123 1,120 0,960 0,953 0,917	1,01467	0,01519 0,01515 0,01298 0,01289 0,01240	13,72
480	1,317 1,563 1,327 1,387 1,337	1,38600	0,0089 0,01057 0,00897 0,00938 0,00904	9,37
720	1,663 1,830 1,917 1,503 1,140	1,61067	0,00750 0,00825 0,00864 0,00678 0,00514	7,26
1000	1,730 1,817 1,577 1,647 1,560	1,66600	0,00562 0,00590 0,00512 0,00534 0,00506	5,41

Experimentální data pro úhelníky:

Čas expozice (h)	Hmotnostní úbytek (experimentální data)	Hmotnostní úbytek (průměrná hodnota)	Korozní rychlost [mm/rok]	Korozní rychlost (průměrná hodnota) [μm/rok]
48	2,131 3,095 2,202 1,833 2,500	2,35238	0,13889 0,20174 0,14355 0,11949 0,16295	153,32 (141,22)
96	2,381 4,310 3,202 3,310 4,560	3,55238	0,07759 0,14044 0,10436 0,10786 0,14859	115,77
240	6,119 7,810 6,524 5,869 7,357	6,73571	0,07977 0,10180 0,08504 0,07651 0,09591	87,80
480	13,548 14,345 12,262 11,750 11,357	12,65238	0,08830 0,09350 0,07992 0,07658 0,07402	82,47
720	21,083 21,405 19,226 15,286 16,190	18,63810	0,09161 0,09301 0,08354 0,06642 0,07035	80,99
1000	20,690 20,381 21,631 19,905 17,821	20,08571	0,06473 0,06376 0,06767 0,06227 0,05576	62,84

Tabulka hmotnostních úbytků:

AL plech-hmotnostní úbytky	Rovnice	Korelace
Lineární	$0,0021x$	0,3809
Kvadratický	$-2E-06x^2 + 0,0032x + 0,3203$	0,8796
Kubický	$5E-09x^3 - 1E-05x^2 + 0,0066x$	0,8901
4. stupně	$-1E-11x^4 + 3E-08x^3 - 2E-05x^2 + 0,0088x$	0,9151
logaritmický	$0,4433\ln(x) - 1,3541$	0,9073
mocninný	$0,0513x^{0,5251}$	0,8543

Úhelník-hmotnostní úbytky	Rovnice	Korelace
Lineární	$0,0229x$	0,9052
Kvadratický	$-1E-05x^2 + 0,0343x$	0,9586
Kubický	$1E-08x^3 + 2E-06x^2 + 0,0295x$	0,9605
4. stupně	$-9E-11x^4 + 2E-07x^3 - 1E-04x^2 + 0,0443x$	0,9667
logaritmický	$6,1457\ln(x) - 23,723$	0,8851
mocninný	$0,1186x^{0,7512}$	0,9621

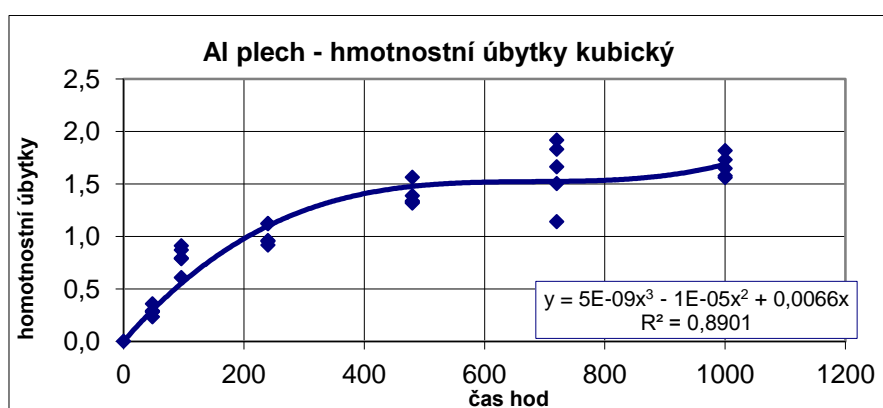
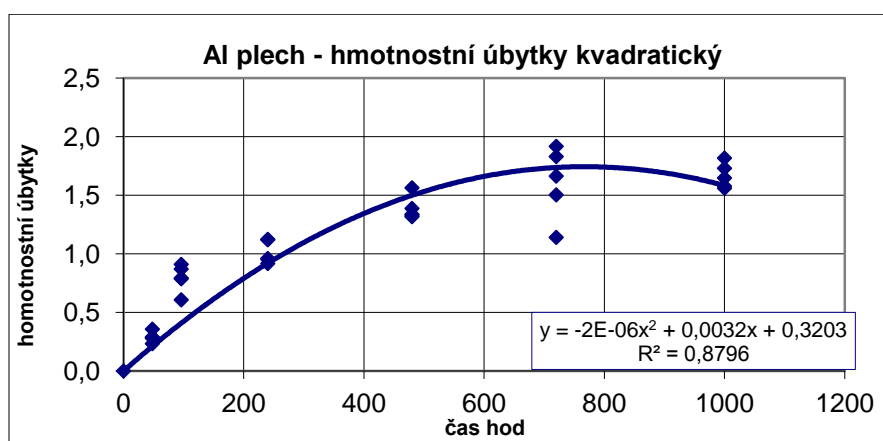
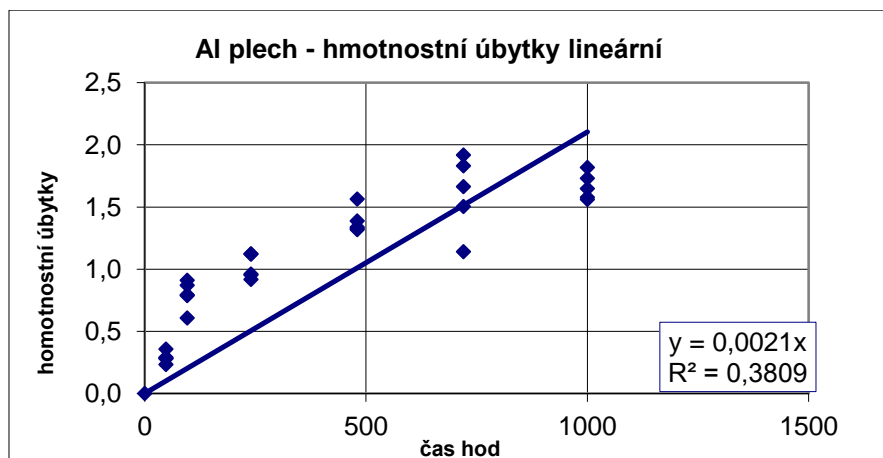
Tabulka rychlostí koroze:

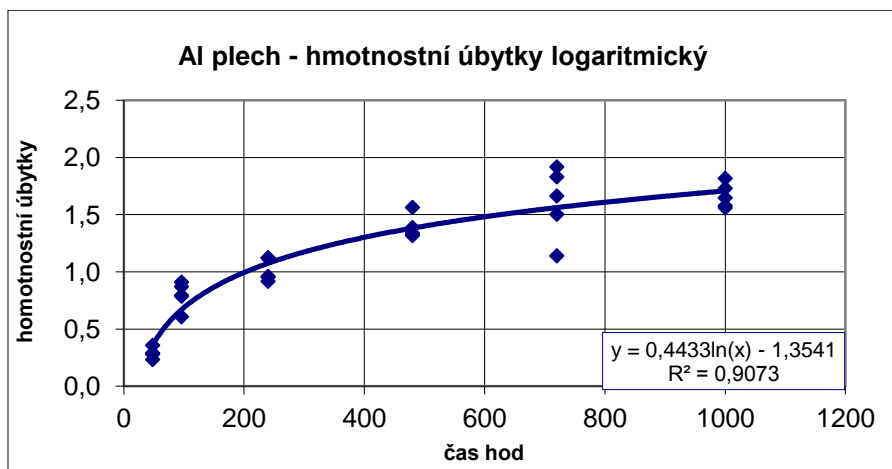
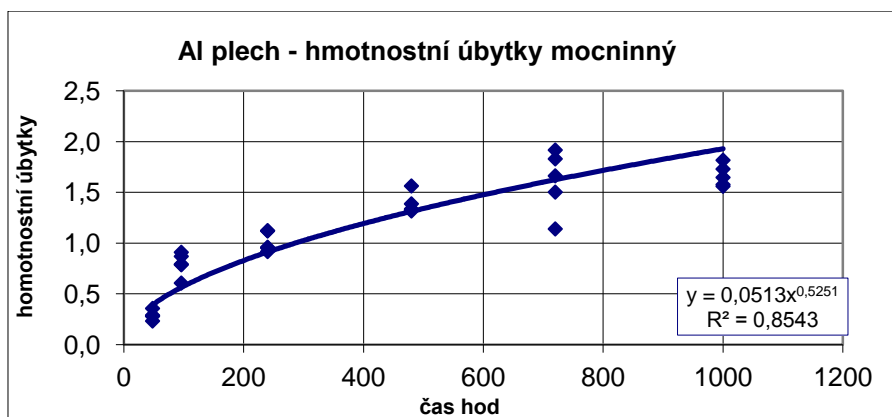
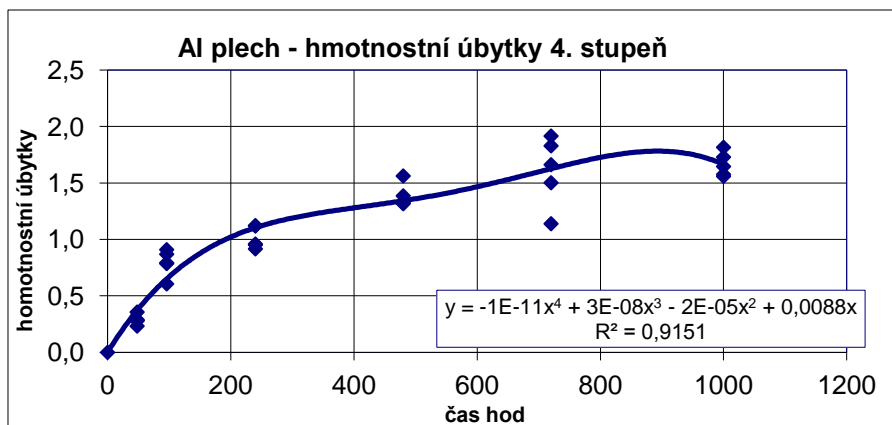
AL plech -rychlost koroze	Rovnice	Korelace
Lineární	$-2E-05x + 0,0219$	0,7135
Kvadratický	$-2E-06x^2 + 0,0032x + 0,3203$	0,792
Kubický	$-1E-11x^3 + 4E-08x^2 - 5E-05x + 0,0257$	0,7932
4. stupně	$-3E-13x^4 + 5E-10x^3 - 3E-07x^2 + 3E-05x + 0,0218$	0,8131
logaritmický	$-0,006\ln(x) + 0,0479$	0,7398
mocninný	$0,1666x^{-0,475}$	0,8277

Úhelník-rychlost koroze	Rovnice	Korelace
Lineární	$-7E-05x + 0,1283$	0,527
Kvadratický	$1E-07x^2 - 0,0002x + 0,143$	0,6097
Kubický	$-6E-10x^3 + 1E-06x^2 - 0,0005x + 0,1689$	0,7203
4. stupně	$1E-12x^4 - 3E-09x^3 + 3E-06x^2 - 0,0009x + 0,187$	0,7417
logaritmický	$-0,026\ln(x) + 0,2431$	0,69
mocninný	$0,3711x^{-0,249}$	0,7359

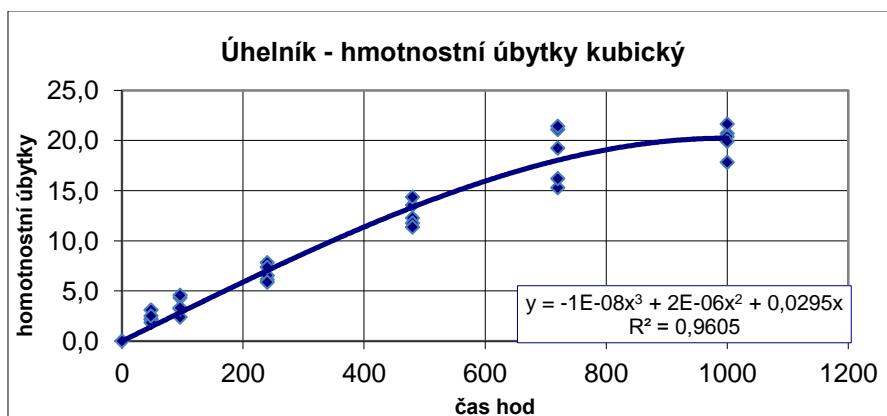
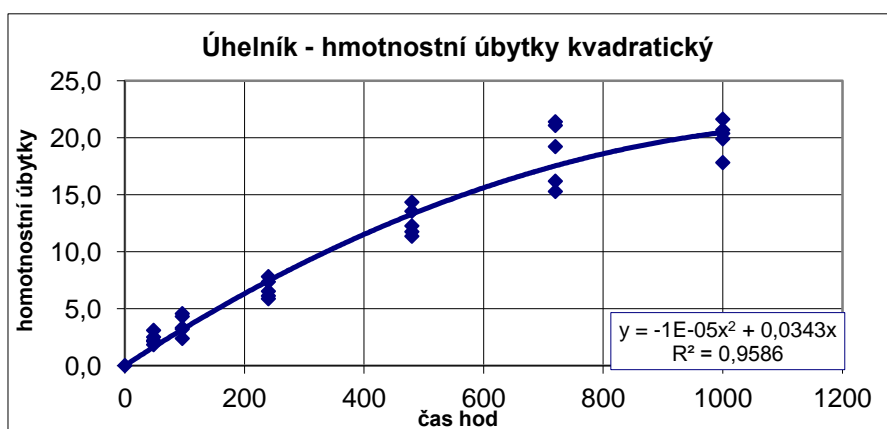
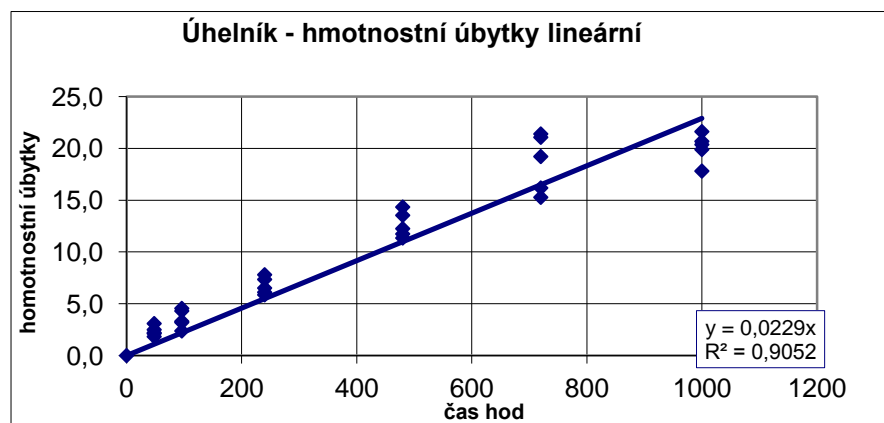
Modelování

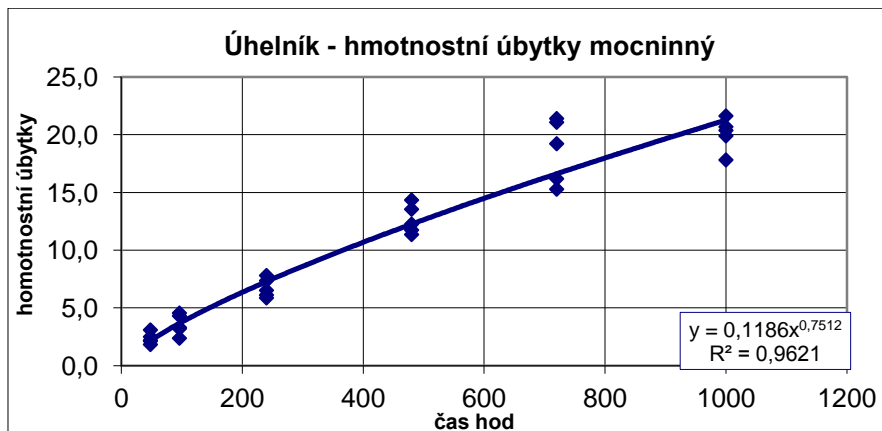
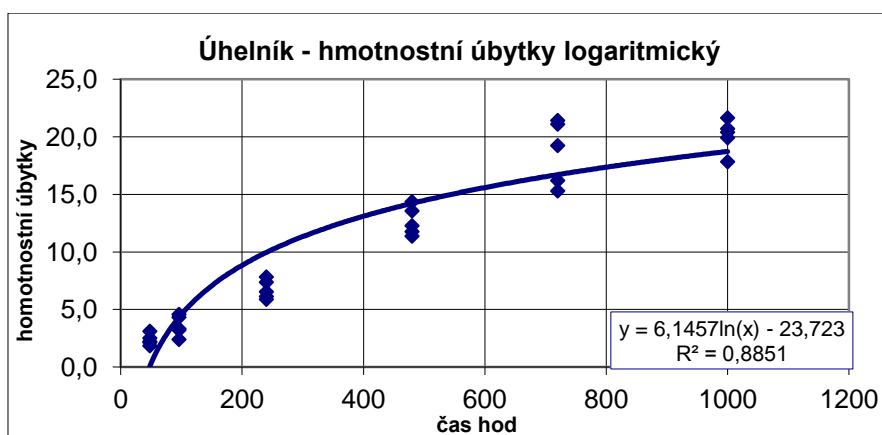
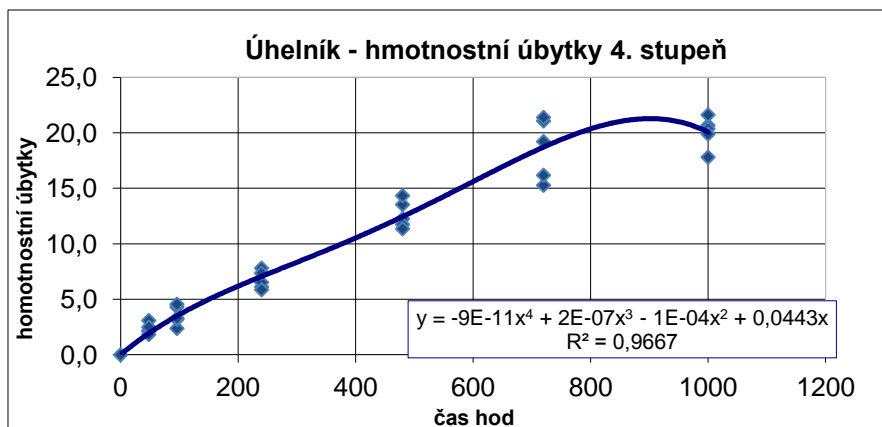
Grafy hmotnostních úbytků hliníkových plechu:



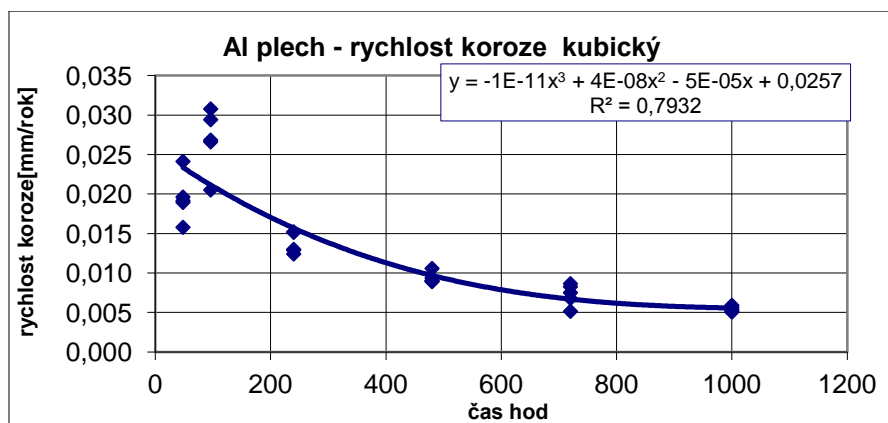
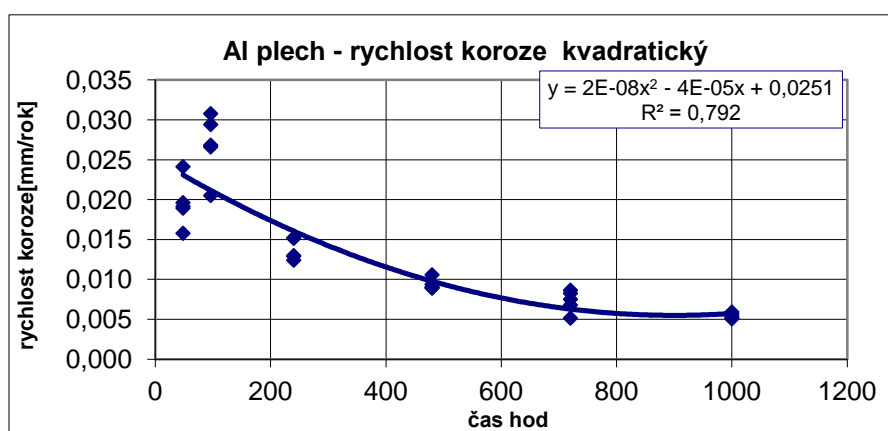
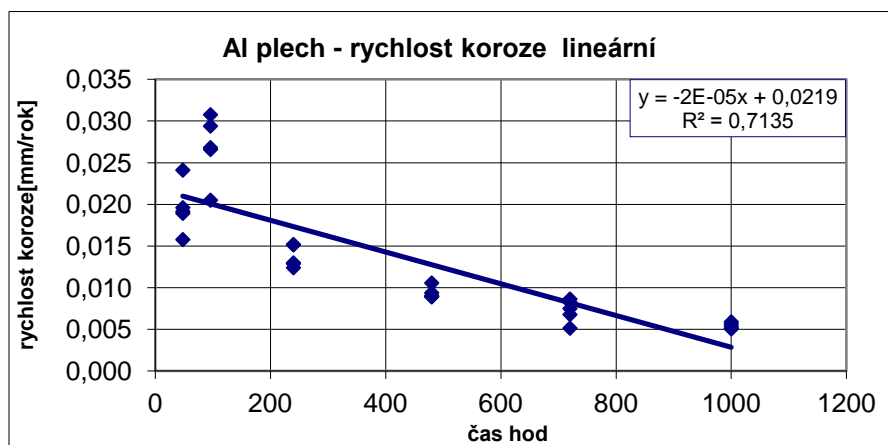


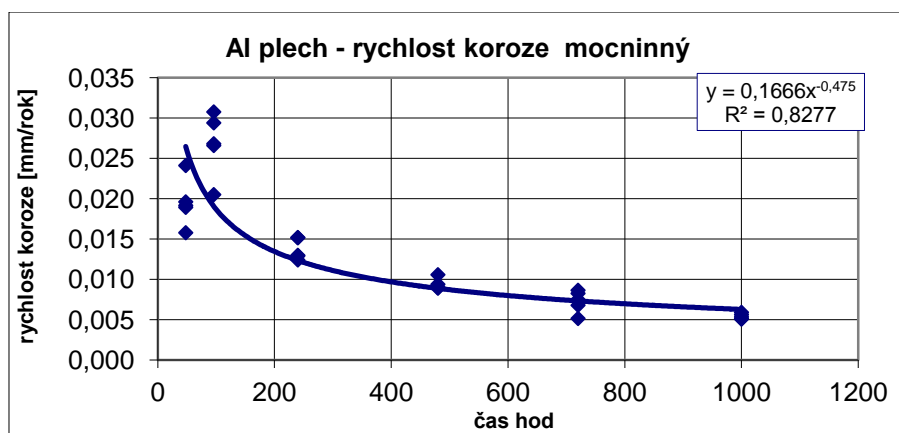
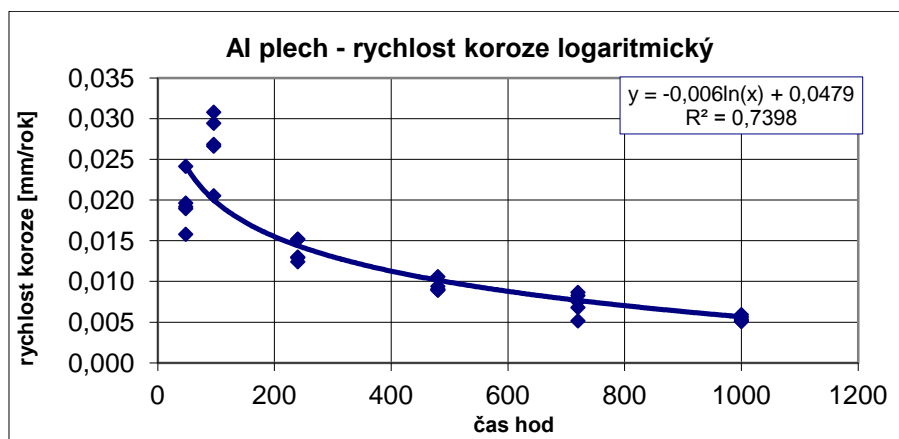
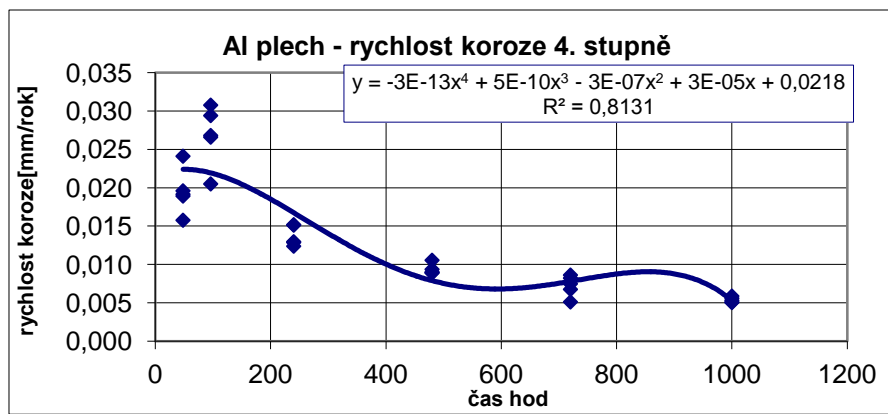
Grafy hmotnostních úbytků úhelníku:



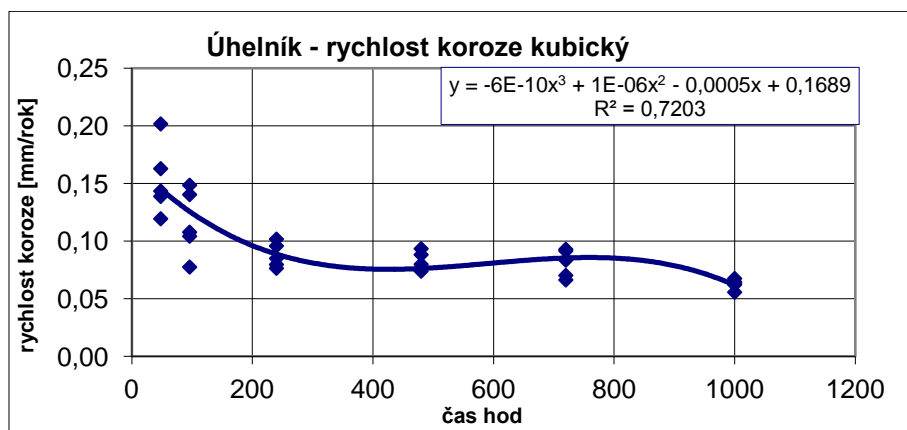
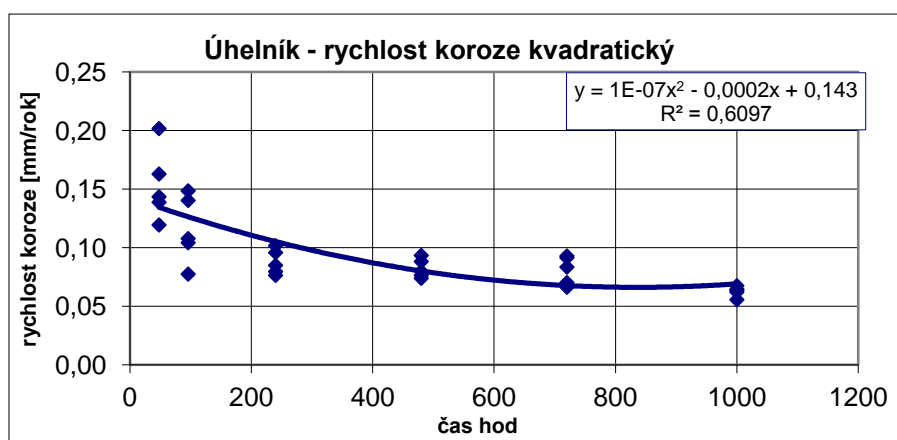
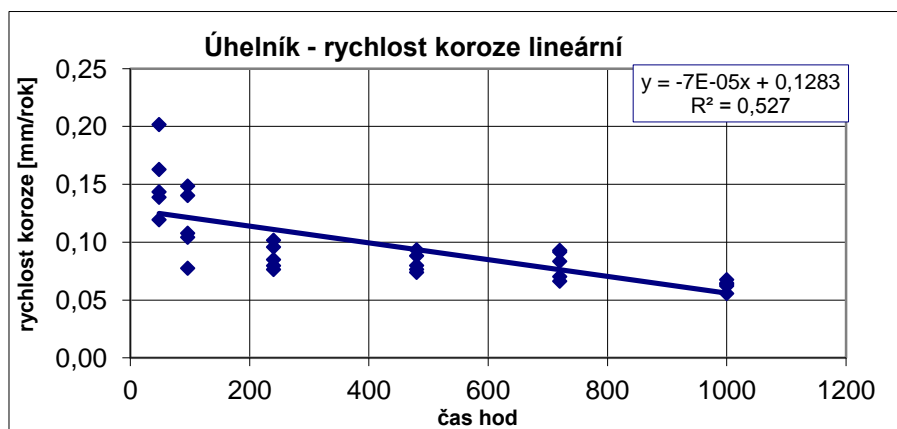


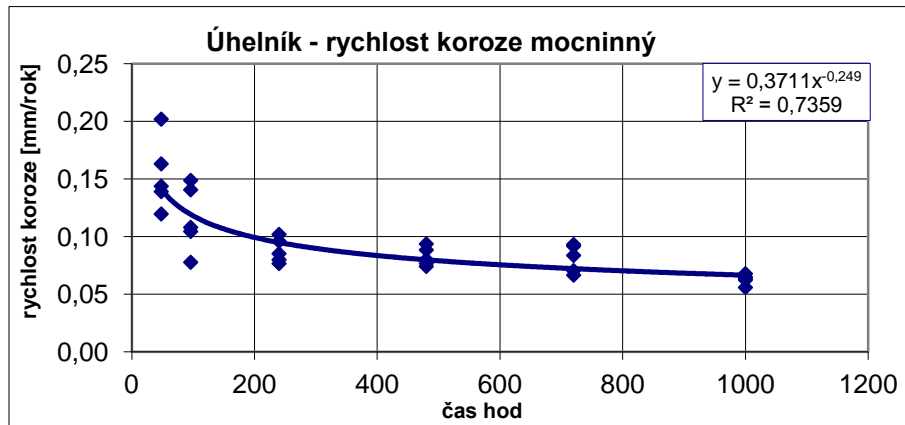
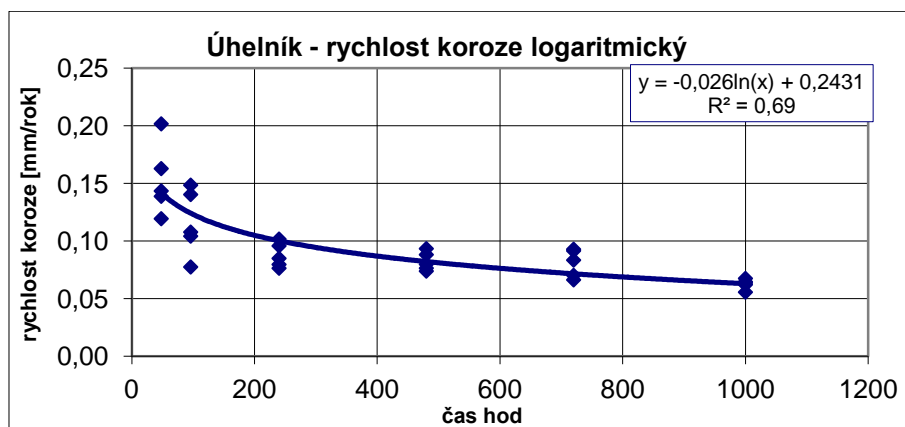
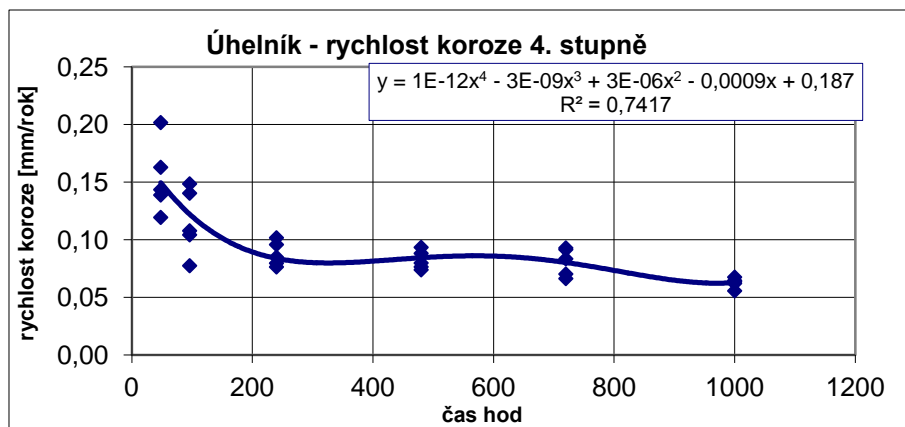
Grafy rychlostí koroze Al plechu:





Grafy rychlostí koroze Al plechu:





Závěry

Z dat experimentu můžeme vidět rozdíl v korozní ochraně povrchově upraveného plechu AlCu_4Mg_1 oproti povrchově neupravenému. Z průměrných hodnot lze vidět, že hmotnostní úbytky u součásti s povrchovou vrstvou čistého hliníku jsou přibližně osm krát menší při době expozice 48 hodin a až zhruba dvanáct krát menší při době expozice 1000 hodin, což odpovídá vznikající pasivní vrstvě u vrstvy čistého hliníku. K porovnání grafu a proložené funkce byla použita korelace. Proložená funkce je tím přesnější, čím je korelace blíže k hodnotě 1.

Pro hmotnostní úbytky byla uvažována podmínka nulových hmotnostních úbytků na počátku experimentů. U hliníkových plechů je nejpříznivější rovnice 4. Stupně $(-1\text{E}-11x^4 + 3\text{E}-08x^3 - 2\text{E}-05x^2 + 0,0088x)$ s korelací 0,9151. Dále následuje rovnice logaritmická a kubická, tyto další rovnice mají chybu větší, ale pouze do 2%. Pro rovnici logaritmickou nemohla být podmínka nulových hmotnostních úbytků matematicky realizovatelná.

Pro hmotnostní úbytky byla uvažována podmínka nulových hmotnostních úbytků na počátku experimentů. U úhelníků je nejpříznivější rovnice 4. Stupně $(-9\text{E}-11x^4 + 2\text{E}-07x^3 - 1\text{E}-04x^2 + 0,0443x)$ s korelací 0,9667. Dále následuje rovnice mocninná, kubická a kvadratická, tyto další rovnice mají chybu větší, ale pouze do 2%. Pro rovnici logaritmickou nemohla být podmínka nulových hmotnostních úbytků matematicky realizovatelná.

Pro rychlost koroze hliníkových plechů je nejpříznivější rovnice mocninná $(0,1666x^{-0,475})$ s korelací 0,8277. Dále následuje rovnice 4. Stupně, tato rovnice má chybu větší, ale pouze do 2%.

Pro rychlost koroze úhelníků je nejpříznivější rovnice 4. stupně $(1\text{E}-12x^4 - 3\text{E}-09x^3 + 3\text{E}-06x^2 - 0,0009x + 0,187)$ s korelací 0,7417. Dále následuje rovnice mocninná, tato rovnice má chybu větší, ale pouze do 2%.

Seznam použité literatury

- [1] MICHNA, Š., LUKÁČ, I., OČENÁŠEK, V., KOŘENÝ, R., DRÁPALA, J., SCHNEIDER, H., MIŠKUFOVÁ, A., a kol., *Encyklopedie hliníku*, Prešov 2005, ISBN 80-89041-88-4
- [2] ČSN EN ISO 9227 (03 8132): *Korozní zkoušky v umělých atmosférách – Zkoušky solnou mlhou*. Praha, Český normalizační institut, 2007. 24 s.
- [3] PTÁČEK, L. a kolektiv, *Nauka o materiálu II.*, Brno: CERM, 1999. 350 s. ISBN 80-7204- 130- 4
- [4] TULKA, J. *Povrchové úpravy materiálů*. 1. vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2005. 136 s. ISBN 80-214-3062-5
- [5] HRUBÝ, V., TULKA, J. *Koroze a ochrana materiálu.*, Brno: Vojenská akademie Brno, 1997. 134 s.
- [6] *Koroze a ochrana materiálů, Učební text určený pro prezenční studium, Fakulta výrobních technologií a managementu Univerzity J.E. Purkyně v Ústí nad Labem*, [PDF dokument]. Ústí nad Labem. [cit. 2012-04-27]. http://www.stefanmichna.com/download/opory/koroze_a_ochrana_materialu.pdf.
- [7] SKÝBA, P., *Hodnocení koroze u vybraných typu hliníkových slitin pro letecký průmysl*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 84s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. BOHUMIL PACAL, CSc.

Seznam příloh

Příloha 1 Graf Al plech - hmotnostní úbytky lineární

Příloha 2 Graf Al plech - hmotnostní úbytky kvadratický

Příloha 3 Graf Al plech - hmotnostní úbytky kubický

Příloha 4 Graf Al plech - hmotnostní úbytky 4. stupně

Příloha 5 Graf Al plech - hmotnostní úbytky logaritmický

Příloha 6 Graf Al plech - hmotnostní úbytky mocninný

Příloha 7 Graf Úhelník - hmotnostní úbytky lineární

Příloha 8 Graf Úhelník - hmotnostní úbytky kvadratický

Příloha 9 Graf Úhelník - hmotnostní úbytky kubický

Příloha 10 Graf Úhelník - hmotnostní úbytky 4. stupně

Příloha 11 Graf Úhelník - hmotnostní úbytky logaritmický

Příloha 12 Graf Úhelník - hmotnostní úbytky mocninný

Příloha 13 Graf Al plech – rychlost koroze lineární

Příloha 14 Graf Al plech – rychlost koroze kvadratický

Příloha 15 Graf Al plech – rychlost koroze kubický

Příloha 16 Graf Al plech – rychlost koroze 4. stupně

Příloha 17 Graf Al plech – rychlost koroze logaritmický

Příloha 18 Graf Al plech – rychlost koroze mocninný

Příloha 19 Graf Úhelník – rychlost koroze lineární

Příloha 20 Graf Úhelník – rychlost koroze kvadratický

Příloha 21 Graf Úhelník – rychlost koroze kubický

Příloha 22 Graf Úhelník – rychlost koroze 4. stupně

Příloha 23 Graf Úhelník – rychlost koroze logaritmický

Příloha 24 Graf Úhelník – rychlost koroze mocninný